

Etude critique du taux de saturation en phosphore dans des sols agricoles en région wallonne en tant qu'indicateur de bonnes pratiques en matière de fertilisation phosphorée



Ce document est à citer de la manière suivante :

Renneson M., Vandenberghe C., Marcoen J.M., 2008. *Etude critique du taux de saturation en phosphore dans des sols agricoles en région wallonne en tant qu'indicateur de bonnes pratiques en matière de fertilisation phosphorée*. Dossier GRENeRA **08-08** 27 p. In Marcoen J.M., Lambert R., Vandenberghe C., Detoffoli M., Benoit J., Deneufbourg M., 2009. *Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne – Rapport d'activités annuel intermédiaire 2008 des membres scientifiques de la Structure d'encadrement Nitrawal*. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux et Université catholique de Louvain, 61 p + annexes

Table des matières

1. SYMBOLES	3
2. INTRODUCTION	4
3. OBJECTIFS	5
4. CONTEXTE	6
5. RESULTATS	9
5.1. EVALUATION DU TAUX DE SATURATION EN PHOSPHORE	9
5.1.1. Statistiques générales	9
5.1.2. Influence du mode de gestion du P et des exploitations agricoles	10
5.1.3. Influence du type de sol	11
5.2. ETUDE DE LA VARIABILITE INTRAPARCELLAIRE	12
5.2.1. Statistiques descriptives des parcelles	12
5.2.2. Etude de la variabilité intraparcellaire	12
5.2.3. Détermination du nombre d'échantillons adéquat	14
5.3. ETUDE DE LA VARIABILITE TEMPORELLE	14
5.3.1. Evolution des paramètres édaphiques et du phosphore	15
5.4. PARCELLES DE LA LOI DU MINIMUM	17
5.4.1. Site expérimental	17
5.4.2. Etude des paramètres édaphiques	18
5.4.3. Etude du taux de saturation en phosphore	18
6. CORRELATIONS	20
7. ETUDE CRITIQUE DU TAUX DE SATURATION EN TANT QU'INDICATEUR AGRONOMIQUE	22
8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	24
9. BIBLIOGRAPHIE	26

1. Symboles

SYMBOLES	SIGNIFICATION
Al	Aluminium
Al _{ox}	Aluminium extrait à l'oxalate
CEC	Capacité d'échange cationique
CFP	Capacité de fixation en phosphore
COT	Carbone organique total
CV	Coefficient de variation
DGPS	Differential Global Positioning System
EDTA	Acide éthylène-diamine-tétracétique (C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₈)
Fe	Fer
Fe _{ox}	Fer extrait à l'oxalate
FUSAGx	Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux
Nt	Teneur en azote total
P	Phosphore
P _{dispo}	Phosphore disponible
P _{ox}	Phosphore extrait à l'oxalate
TSP	Taux de saturation en phosphore

2. Introduction

Elément indispensable, le phosphore pose actuellement des problèmes environnementaux car il intervient au même titre que l'azote dans l'eutrophisation des cours d'eau. Cette problématique est largement d'actualité avec la Directive cadre Eau qui impose aux états-membres d'atteindre un bon état des cours d'eau d'ici 2015. Cela nécessite la mise en place de mesures tant au niveau de l'azote, comme c'est actuellement le cas avec Nitrawal par exemple, qu'au niveau du phosphore.

Dans de nombreux pays, la gestion du phosphore est entrée dans les mœurs et des normes sont déjà en vigueur. C'est par exemple le cas au Canada, aux Pays-Bas ou encore en Région flamande où la présence d'élevage de porcs engendre de nombreux problèmes environnementaux. En Région wallonne, une gestion adéquate du phosphore est également nécessaire et doit passer par une meilleure connaissance du comportement de cet élément et des indicateurs existants.

Les rejets urbains ont fortement diminués ces dernières années suite aux mesures prises en matière d'interdiction des phosphates dans les lessives et aux systèmes de déphosphatation installés dans les stations d'épuration. Cette diminution des pertes en P d'origine urbaine fait de l'agriculture la première source d'émission de phosphore vers l'environnement.

C'est dans ce contexte qu'un travail de fin d'études a été réalisé au sein du Laboratoire de Géopédologie de la FUSAGx en étroite collaboration avec GRENeRA dans le but de tester la pertinence du taux de saturation en phosphore (TSP) en tant qu'indicateur des pratiques agricoles en matière de fertilisation phosphorée. Les parcelles étudiées dans le cadre de cette recherche sont issues des exploitations agricoles du Survey Surfaces Agricoles suivies par GRENeRA.

Ce travail a abouti en une réflexion globale tant d'un point de vue pédologique qu'agronomique, qu'il convient de développer ici.

3. Objectifs

Ce travail de fin d'études a comme objectif général d'évaluer la pertinence du taux de saturation en phosphore du sol (TSP) en tant qu'indicateur de bonnes pratiques agricoles en matière de fertilisation phosphorée en Région wallonne. La question a été de se demander si le TSP généralement utilisé dans un but d'évaluation environnementale pourrait également être utilisé dans un but agronomique. Cela a été abordé en quatre points plus précis, détaillés ci-dessous.

- **EVALUATION DU TAUX DE SATURATION EN PHOSPHORE :** L'objectif de ce point est de réaliser un inventaire de l'état du TSP dans des sols agricoles des régions limoneuse, sablo-limoneuse et dans le Condroz.
L'objectif est donc de caractériser le TSP dans les sols agricoles mais également de mettre en parallèle ce paramètre avec les caractéristiques édaphiques et les apports en P.
- **ETUDE DE LA VARIABILITE INTRAPARCELLAIRE DU TAUX DE SATURATION EN PHOSPHORE :** La variabilité spatiale du TSP est déterminée sur base d'un échantillonnage aléatoire stratifié. Cette étude a pour but d'analyser la continuité spatiale de ce paramètre et de déterminer la distance minimale entre les échantillons afin de respecter une indépendance spatiale. Cette dernière condition est, en effet, nécessaire à la réalisation d'un échantillon composite et à la détermination de la moyenne à l'échelle d'une parcelle. De plus, le nombre minimal d'échantillons à réaliser pour les différents paramètres étudiés va pouvoir être défini lors de cette analyse.
Cette évaluation est indispensable à un échantillonnage correct en vue d'une éventuelle utilisation du TSP dans le but d'une évaluation agronomique.
- **ETUDE DE LA VARIABILITE TEMPORELLE DU TAUX DE SATURATION EN PHOSPHORE :** Le Laboratoire de Géopédologie de la FUSAGx dispose d'échantillons de sol récoltés dans les parcelles du Survey Surfaces Agricoles de GRENeRA en 2004. L'évolution temporelle du TSP dans ces sols va ainsi pouvoir être étudiée en comparant les résultats des échantillons prélevés en 2004 avec ceux prélevés en 2008. Cette question a pour but de déterminer l'effet du mode de gestion pratiqué par l'agriculteur sur l'évolution du TSP et des teneurs en phosphore disponible (P_{dispo}) du sol.
- **ETUDE DES PARCELLES DE LA LOI DU MINIMUM :** Ce dernier point analyse les parcelles de la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux où la loi du minimum est appliquée. Cela signifie que depuis maintenant plus de 100 ans, ces parcelles reçoivent le même type de fertilisation. Cette approche va permettre de faire ressortir l'effet du mode de gestion sur le TSP, le facteur type de sol étant, *a priori*, identique pour chacune des parcelles.

4. Contexte

Une gestion adéquate et aisée du phosphore nécessite l'existence d'indicateurs agronomiques et environnementaux facilement utilisables. Plusieurs indicateurs environnementaux existent dont le plus connu est le **taux de saturation en phosphore** (TSP). Il est actuellement utilisé aux Pays-Bas et en Flandre selon la formule suivante :

$$TSP = \frac{P_{ox}}{0,5(Fe_{ox} + Al_{ox})} \times 100 = \frac{P_{ox}}{CFP} \quad (\%)$$

Où TSP est la taux de saturation en phosphore exprimé en %, P_{ox} , la teneur en phosphore et Fe_{ox} et Al_{ox} , les teneurs en fer et en aluminium extrait selon la méthode de Blakemore qui consiste à extraire les différents éléments à l'oxalate d'ammonium et à l'acide oxalique durant 2 heures dans l'obscurité et CFP est la capacité de fixation en phosphore calculée sur base des teneurs en Fe et Al.

Le TSP correspond à la proportion des sites d'échange occupés par du P.

Utilisé dans de nombreux pays et régions (Pays-Bas, Canada, Flandre, *etc.*), le TSP est considéré comme un bon indicateur de la tendance d'un sol à libérer le P dans les eaux de ruissellement et de drainage (HUGUES *et al.*, 2000). Cet indicateur a donc principalement un rôle d'évaluation des risques environnementaux de perte en P (BEAUCHEMIN et SIMARD, 1999 ; LABOSKI et LAMB, 2004). Cependant, le TSP ne permet pas de prédire les quantités de P qui seront perdues mais uniquement d'évaluer le risque de perte en P. En effet, lorsque le sol tend à se saturer, les équilibres sont modifiés et la teneur en ions phosphates dans la solution du sol augmente, ce qui accroît les risques de transfert vers l'environnement (TUNNEY *et al.*, 2003 et MC DOWELL et SHARPLEY, 2001 cités par DORIOZ et TREVISAN, 2008).

Les échantillons prélevés dans le cadre de ce travail ont été analysés en laboratoire afin de déterminer le TSP selon la méthode de Blakemore. Au niveau du P, les teneurs en P_{dispo} également été déterminées par la méthode de Lakanen-Erviö, modifiée par Cottenie *et al.* Cette méthode consiste à extraire le P_{dispo} grâce à l'ajout d'acétate d'ammonium 0,5 M et d'éviter sa complexation par l'ajout d'EDTA 0,02 M à pH 4,65. Le phosphore extrait est ensuite mesuré par colorimétrie à 430 nm.

Le pH H_2O et KCl ont également été déterminés. Enfin, les échantillons ont été passés au spectromètre proche infrarouge afin d'estimer le taux de carbone organique, la capacité d'échange cationique, le taux d'azote total et le pourcentage d'argile. Ces résultats ont permis de caractériser les sols étudiés.

Afin de répondre aux quatre questions abordées dans ce travail, différents protocoles d'échantillonnage ont été mis en oeuvre :

- **EVALUATION DU TAUX DE SATURATION EN PHOSPHORE** : Afin de pouvoir distinguer l'effet des pratiques agricoles et du type de sol sur le TSP, un échantillon est prélevé par type de sol dans l'horizon de surface au sein de chaque parcelle agricole. 16 échantillons sont prélevés à la sonde tubulaire dans une zone de 2 mètres de rayon pour ensuite être regroupés en un échantillon composite, ce qui permet de limiter les risques d'erreurs d'échantillonnage. Cette étude est uniquement réalisée au niveau des terres cultivées et non dans les prairies, moins problématiques et est ciblée sur l'horizon de surface, le plus riche en P. Pour déterminer le type de sol auquel on a affaire, un sondage pédologique est effectué lors de chaque prélèvement. Les résultats sont également interprétés en fonction du mode de gestion du P appliqué par l'agriculteur, déterminé sur base d'un bilan phosphaté.

- ETUDE DE LA VARIABILITE INTRAPARCELLAIRE DU TAUX DE SATURATION EN PHOSPHORE : Cette étude a été réalisée au sein de deux parcelles agricoles avec des modes de gestion très contrastés. Au sein de chacune de ces parcelles, un maillage de 12,5 mètres de côté a été réalisé à l'aide du DGPS.
- ETUDE DE LA VARIABILITE TEMPORELLE DU TAUX DE SATURATION EN PHOSPHORE : Afin de percevoir l'effet des modes de gestion sur l'évolution du TSP, des échantillons de sol datant de 2004 ont été comparés à ceux prélevés dans les mêmes conditions en 2008. Cette étude a pu être réalisée au sein de 5 exploitations agricoles du Survey Surfaces Agricoles dont les apports en P sont connus.
- ETUDE DES PARCELLES DE LA LOI DU MINIMUM : L'analyse d'échantillons issus des parcelles de la FUSAGx appliquant la loi du minimum permet de percevoir l'effet des quantités de phosphore minéral appliquées sur les parcelles, le type de sol étant *a priori* homogène. Trois modes de gestion ont été étudiés *via* la réalisation d'un échantillon composite dans une zone de 1 m de rayon : NPK, NK et 0. Ces parcelles reçoivent un traitement identique depuis plus de 100 ans, ce qui permet de percevoir l'effet à long terme des apports en P.

L'étude de parcelles du Survey Surfaces Agricoles a permis de répondre à plusieurs des questions abordées lors de ce travail. Pour ce faire, six exploitations agricoles ont été choisies en fonction de la localisation de l'exploitation et de la pression « phosphore organique » attendue. Ces six exploitations sont localisées en Régions limoneuse, sablo-limoneuse et dans le Condroz. Ces régions ont été choisies car elles sont les plus problématiques au niveau du P (SATUPHOS, 2008) et présentent une occupation du sol majoritairement agricole.

Le mode de gestion du P appliqué dans ces exploitations a été déterminé *via* la réalisation d'un bilan phosphaté pour une période de 5 ans. Cela consiste simplement en une différence entre les apports et les exportations par les cultures, les apports étant de deux types : organique et minéral. La réalisation de ces bilans a été possible par la connaissance précise des apports organiques et minéraux et des rendements des cultures. Les bilans sont considérés comme positifs lorsque les apports sont supérieurs aux exportations par les cultures, c'est-à-dire lorsqu'il y a enrichissement du sol et négatifs dans le cas contraire.

Trois classes ont ainsi pu être distinguées, chacune contenant 2 exploitations (figure 1) :

- CLASSE 1 : exploitations dont la majorité des parcelles présente des bilans positifs ;
- CLASSE 2 : exploitations dont la majorité des parcelles présente un bilan relativement équilibré. Ces exploitations sont considérées comme des intermédiaires entre les modes de gestion extrêmes ;
- CLASSE 3 : exploitations dont la majorité des parcelles présente des bilans largement négatifs, c'est-à-dire que les apports sont très faibles et/ou que les exportations sont très élevées.

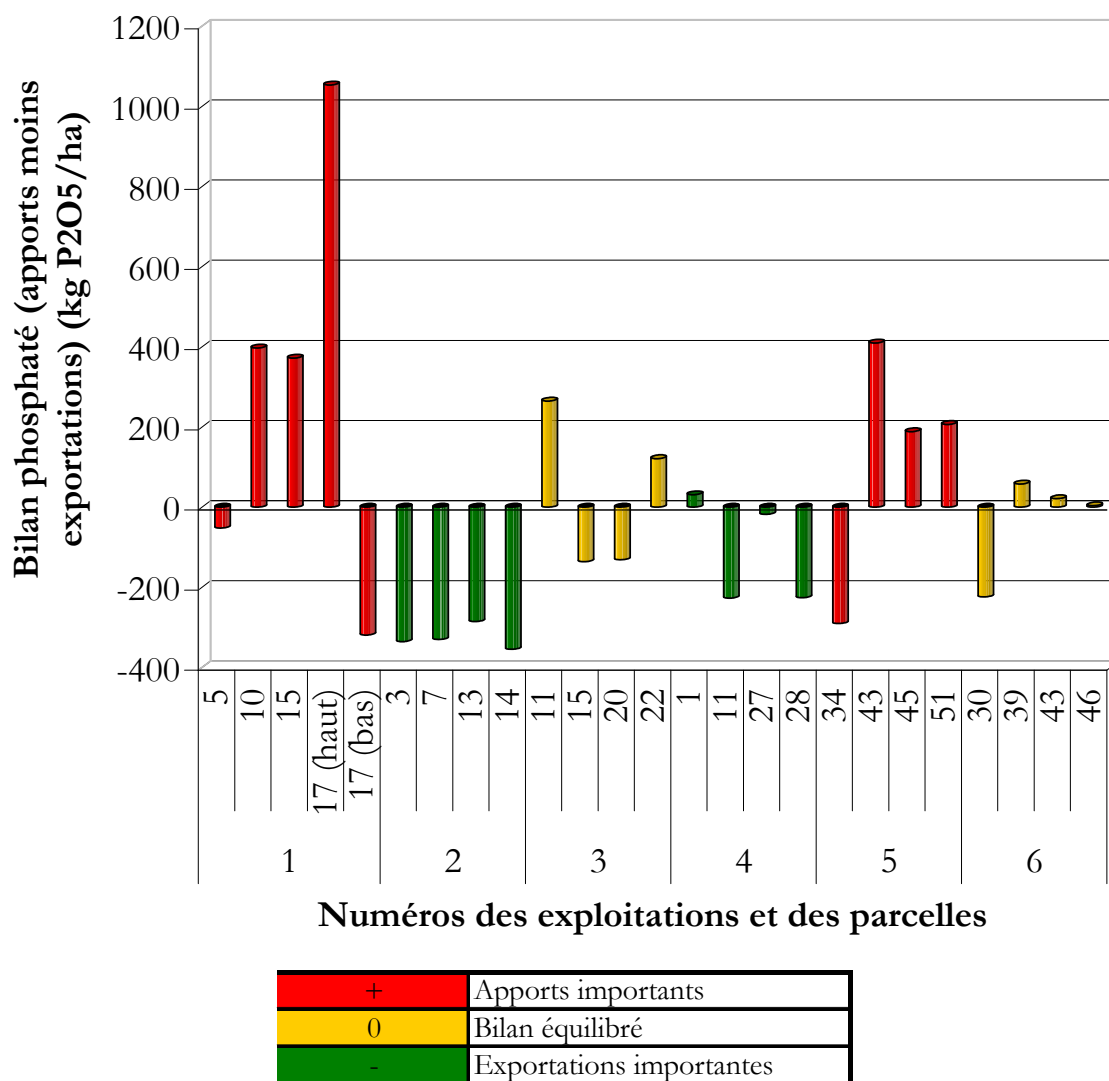


Figure 1 - Résultats des bilans phosphatés pour les différentes parcelles et exploitations.

Au sein de chacune de ces exploitations, quatre parcelles agricoles ont été choisies. Ce choix est basé sur les types de sol présents d'après la carte numérique des sols de Wallonie, le passé cultural de la parcelle, la topographie, les résultats des analyses du P_{dispo} réalisées en 2004 ainsi que la taille des parcelles. Lors du choix des parcelles, l'objectif a été de trouver un équilibre entre le critère « type de sol et représentativité des régions étudiées » et le critère « nombre suffisant d'échantillons par type de sol ». Ce dernier critère est important afin de pouvoir réaliser par la suite des analyses statistiques sur les résultats.

5. Résultats

Afin de répondre à l'objectif premier du travail, une série de questions a été abordée. Voici les différentes observations tirées de ces analyses.

5.1. Evaluation du taux de saturation en phosphore

Il s'agit de réaliser une évaluation du TSP dans des sols agricoles. L'objectif de cette partie du travail de fin d'études est à la fois de caractériser le TSP dans différentes régions mais également et surtout de comprendre la relation entre ce paramètre et les caractéristiques du sol, de même qu'avec les niveaux d'apport en P.

5.1.1. Statistiques générales

En vue d'étudier les gammes de valeurs rencontrées dans les sols agricoles pour le TSP, 24 parcelles ont été échantillonnées. Ces dernières sont situées dans des exploitations avec des modes de gestion du P très contrastés. On pouvait donc s'attendre à des variations des teneurs en P relativement importantes, or ce ne fut pas le cas. En effet, la variation est importante pour le P disponible (CV=67%) mais qu'elle y est beaucoup moins dans le cas du P_{ox} (CV=21,5%). Il semble donc que le P_{ox} soit un paramètre beaucoup moins discriminant que le P_{dispo} . Cette différence pourrait entre autre être expliquée par l'extractif utilisé dans la méthode de Blakemore.

L'observation des résultats analytiques montre un TSP qui varie entre 17 et 84,1%, avec une valeur moyenne de 42,3%. Ces valeurs peuvent être comparées à celles de SATUPHOS obtenues avec un nombre d'échantillons relativement similaire (SATUPHOS, 2008). Des différences entre les deux sources de données peuvent être observées mais celles-ci ne sont pas significatives lorsque l'on se concentre sur la Région limoneuse.

En Flandre, on considère qu'un TSP supérieur à 24% (DE SMET *et al.*, 1996) induit un risque environnemental important. Cependant seuls 10% des échantillons prélevés lors de cette étude présentent un TSP inférieur à cette valeur seuil. On peut donc considérer que soit les sols wallons présentent des teneurs beaucoup trop importantes au niveau du P, soit que les seuils en application en Flandre ne peuvent être extrapolés en Région wallonne. Cependant, une valeur attire notre attention. Il s'agit de la valeur maximale du TSP qui est de 84%, ce qui laisse entrevoir des problèmes liés au P dans cette parcelle.

	Argile en %	COT en %	Nt en %	CEC en cmol/kg	Pox en mmol/kg	Alox en mmol/kg	Feox en mmol/kg	CFP en mmol/kg	TSP en %	Pdispo en mg/100g
Effectif	53	57	56	57	57	57	57	57	57	57
Moyenne	15.8	1.4	0.13	13.1	15.4	29.8	46.4	38.1	42.3	12.8
Écart-type	3.6	0.2	0.02	2.1	3.3	7.1	10.6	8.0	13.1	8.6
CV (%)	23.0	17.6	16.19	16.1	21.5	23.9	22.9	20.9	31.1	66.8
Minimum	6.7	0.9	0.08	7.6	6.2	18.4	27.2	24.8	17.0	2.4
Maximum	23.3	2.2	0.18	19.2	25.5	43.8	75.8	58.3	84.1	47.9
Aplatissement (coefficient de Kurtosis)	0.23	2.48	0.34	1.88	1.32	-0.78	0.24	0.04	0.92	4.97
Coefficient d'assymétrie	-0.28	1.09	0.23	0.38	0.06	0.26	0.69	0.71	0.49	2.08

Figure 2 - Statistiques descriptives des échantillons relatifs à la question &.

5.1.2. Influence du mode de gestion du P et des exploitations agricoles

L'analyse de la variance met en évidence, pour une grande partie des paramètres, une différence hautement significative, voire très hautement significative entre les exploitations.

Par contre, les teneurs en P, que ce soit le P_{dispo} ou le P_{ox} , ne sont pas directement liées aux modes de gestion du P comme on pouvait s'y attendre. En effet, bien qu'une partie des parcelles présentent des teneurs en P directement liées au mode de gestion, ce dernier n'explique pas tout. En effet, certaines exploitations présentent un TSP inférieur aux autres exploitations alors que le bilan phosphaté est largement positif (exploitation 3). Cela est en partie expliqué par la CFP élevée observée dans cette exploitation. Cependant, d'autres cas aboutissent à la même conclusion sans pour autant avoir une CFP élevée. De même, l'exploitation 6 présente un TSP élevé alors que le bilan phosphaté est équilibré. Le TSP n'est donc pas un paramètre directement lié au mode de gestion du P et n'est donc pas illustratif des pratiques agricoles en matière de fertilisation.

On considère que la gestion phosphorée explique principalement les paramètres liés au P, c'est-à-dire le P_{ox} , P_{dispo} et le TSP. Le Fe_{ox} et l' Al_{ox} sont, quant à eux, principalement liés au type de sol même si certaines études (SHARPLEY, 1996 ; LABOSKI et LAMB, 2004) ont montré que les apports de fertilisants modifiaient la CFP dans un sens ou dans l'autre. Cette dernière observation a également pu être faite dans ce travail de fin d'études. En effet, une CFP plus faible est observée lorsque les apports en phosphore, déterminés sur base du bilan phosphaté, sont élevés. Cette observation est confirmée par l'étude d'un cas particulier où au sein d'une même parcelle agricole, un même type de sol comprend deux modes de gestion différents.

Cependant, de manière générale, des différences hautement significatives de la CFP entre les exploitations sont observées, et sont principalement expliquées par la localisation des exploitations au sein de différentes régions agricoles. Ainsi, on remarque une teneur en Al_{ox} plus élevée dans le Condroz que dans les autres régions.

L'analyse des données de la CFP montre également une teneur en Fe_{ox} plus importante que celle de l' Al_{ox} , preuve que ce dernier paramètre est moins déterminant dans la valeur de la CFP que Fe_{ox} .

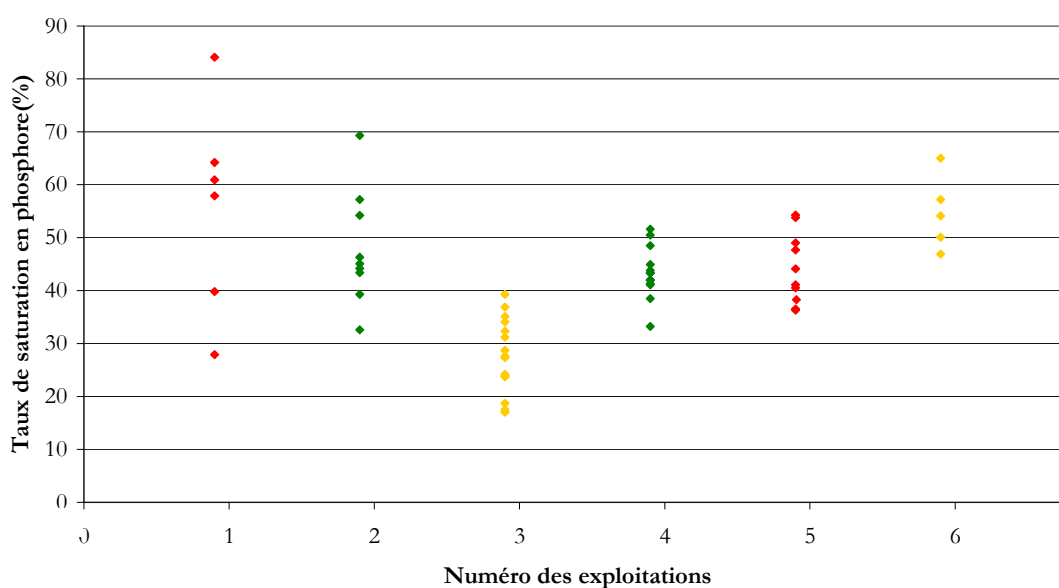


Figure 3 - Graphique représentant le taux de saturation en phosphore en fonction des exploitations.

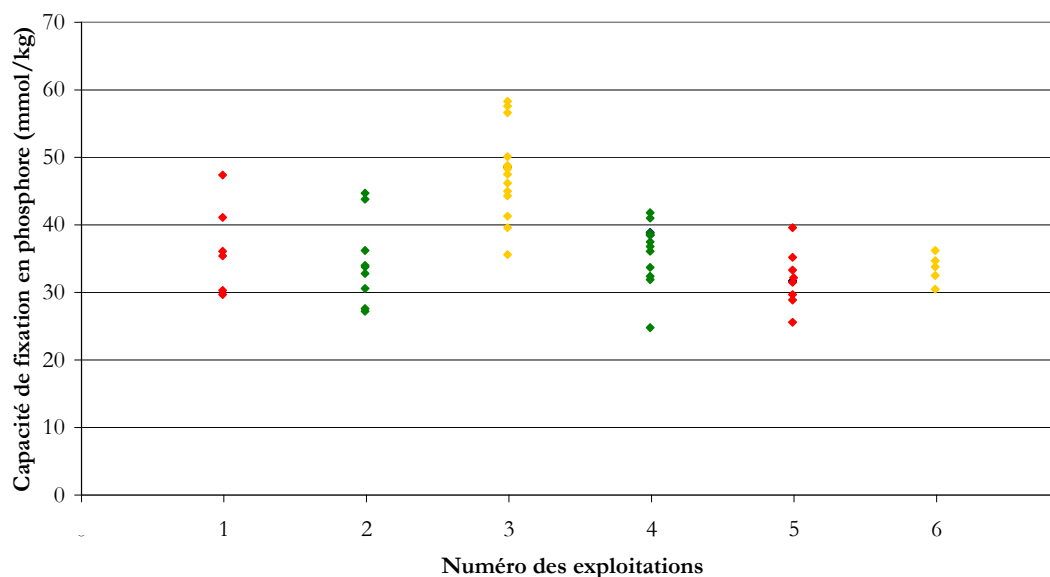


Figure 4 - Graphique représentant la capacité de fixation en phosphore en fonction des exploitations.

5.1.3. Influence du type de sol

L'analyse statistique des résultats analytiques en fonction des types de sol a également été réalisée et a permis de mettre en exergue des différences significatives entre les types de sol pour les teneurs en Fe_{ox} .

Afin de comprendre de manière plus fine l'influence du type de sol, une décomposition du sigle pédologique en ses différents symboles a été réalisée. Elle permet de mettre en évidence des différences significatives entre les textures pour le paramètre Fe_{ox} . En effet, ce paramètre présente des teneurs supérieures lorsque la texture est limoneuse et inférieure lorsqu'elle est argileuse.

Aucune différence significative n'a pu être détectée pour les autres paramètres par contre. Cependant, des observations peuvent quand même être faites. Ainsi, la présence de teneurs de P_{ox} plus élevées et de CFP assez faibles pour les textures sablo-limoneuses et argileuses explique les TSP supérieurs de ces types de texture. Ces observations montrent l'importance de la prise en compte de la texture dans l'observation des résultats. Cependant, il est parfois difficile pour certaines textures de différencier l'effet de la texture de celle du mode de gestion, lorsque ce type de sol n'est présent que dans une seule exploitation. C'est, par exemple, le cas des sols argileux.

Au niveau du drainage par contre, aucune différence significative n'a pu être mise en évidence. Cependant, on remarque que les paramètres liés au P (P_{dispo} , P_{ox} et TSP) sont inférieurs lorsque le drainage est mauvais. Cela peut éventuellement être expliqué par un apport moindre dans les zones moins bien drainées. Les teneurs en Fe_{ox} dépendent également du drainage avec des teneurs diminuant lorsque celui-ci devient mauvais, sans pouvoir pour autant généraliser cette observation.

5.2. Etude de la variabilité intraparcellaire

La mesure adéquate d'un élément demande la connaissance de ses caractéristiques. En effet, aucune moyenne ne peut, par exemple, être déterminée sans que les échantillons ne soient indépendants les uns des autres. Cette indépendance peut être évaluée *via* l'étude de la variabilité intraparcellaire et la réalisation de semi-variogrammes. De même, la réalisation de cartes de krigeage permet de comprendre la distribution spatiale des éléments au sein des parcelles agricoles.

Très peu d'études sur la variabilité spatiale du TSP ont été réalisées (DE SMET *et al.*, 1996). LEINWEBER *et al.* (1997) a cependant pu montrer que pour des contextes différents, la variabilité du TSP était relativement différente.

5.2.1. Statistiques descriptives des parcelles

Deux parcelles ont été utilisées alors de l'étude de cette problématique. Ces deux parcelles présentent des modes de gestion du P très contrastés. Cette caractéristique est directement perceptible lors de l'observation des teneurs en P et du TSP. En effet, la première parcelle présente un TSP moyen de 64,7% et la deuxième de 38,6%. Ces différences sont directement liées aux quantités de P apportées par l'agriculteur, le type de sol étant similaire.

L'analyse des statistiques descriptives permet également d'observer la variation des différents paramètres au sein de chacune des parcelles. Cette variation est directement fonction de la parcelle. Le P_{ox} , par exemple, présente un coefficient de variation de 7,5 à 11,6% en fonction de la parcelle. De même, le Fe_{ox} présente un coefficient de variation de 16% dans le cas de la parcelle 1 et de 8,6% pour la parcelle 2.

5.2.2. Etude de la variabilité intraparcellaire

Afin de mettre en exergue la variabilité spatiale des paramètres liés au P et les caractéristiques géostatistiques de ces paramètres, un maillage systématique de 12,5 mètres de côtés a été réalisé. Les échantillons ont été localisés précisément à l'aide d'un DGPS.

L'analyse géostatistique des échantillons a été réalisée afin de déterminer la distance minimale à respecter entre les échantillons. Cette analyse consiste, entre autre, à réaliser un semi-variogramme, c'est-à-dire une représentation graphique de la relation entre la semi-variance et la distance entre les points (BOGAERT, 2000, cité par COLINET, 2003). De ce semi-variogramme, différentes observations peuvent être tirées :

- **Portée (range)** : distance à partir de laquelle les points sont indépendants, c'est-à-dire l'intervalle optimal d'échantillonnage ou encore la distance limite d'autocorrélation spatiale (MULLA et MCBRATNEY, 2000),
- **Palier (sill)** : valeur maximale de la semi-variance ou valeur de la semi-variance lorsque la distance correspond à la portée,
- **Effet pépite (nugget)** : variabilité due aux erreurs de mesure, mais également à la variabilité spatiale sur des distances inférieures au pas (*lag*) le plus petit, et
- **Rapport $C/C+Co$** : degré de différenciation spatiale des points. Au plus le rapport $C/(C+Co)$ est faible, au plus l'effet pépite est marqué et la proportion de variance prise en charge par le modèle est faible.

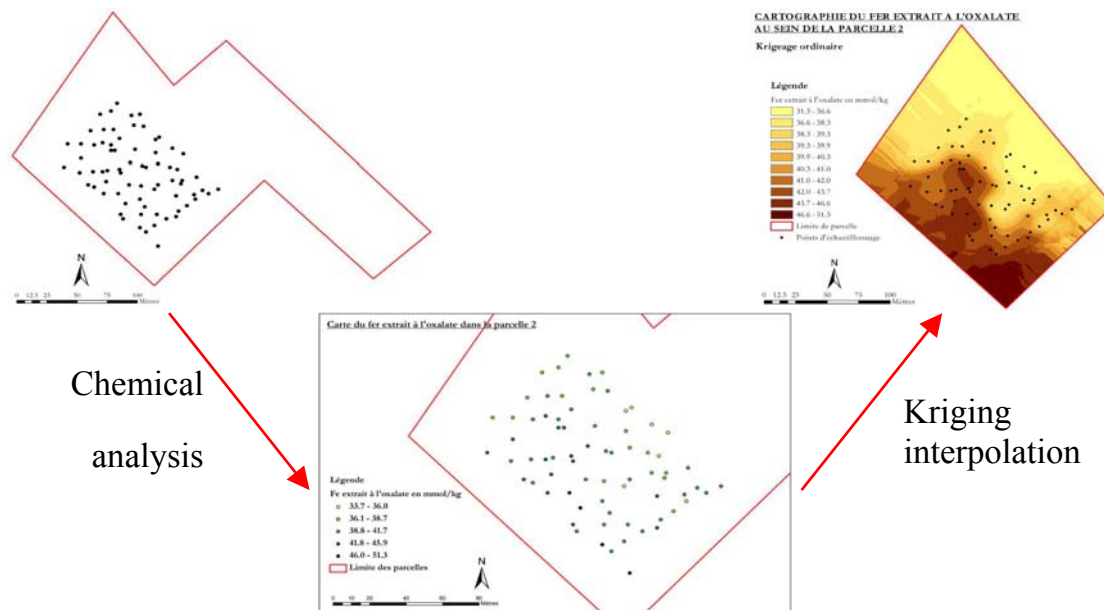
La détermination de l'ensemble de ces paramètres a permis de comprendre la structure spatiale du TSP et les distances minimales à respecter entre les prélèvements d'un échantillon composite.

La majorité des portées déterminées présentent des valeurs proches de 100 mètres. Seule la CFP présente une portée de l'ordre de 30 mètres dans les deux parcelles. Cette distance correspond à la distance à respecter entre les prélèvements d'un échantillon composite. Il est assez difficile de ne prélever qu'un échantillon tous les 100 mètres au sein d'une parcelle et d'arriver malgré tout à prélever un nombre suffisant d'échantillons au sein de celle-ci. Ainsi, pour déterminer l'intérêt de cette prise en compte de la variabilité spatiale, une analyse des résultats du krigeage (voir ci-après) a été réalisée et montre qu'il n'est pas indispensable de tenir compte de cette variabilité spatiale car la différence entre une moyenne tenant compte de cette variabilité et une moyenne selon un échantillonnage classique est inférieure à la précision analytique des méthodes de mesure. Ces résultats sont valables pour les sols limoneux.

Une autre phase a consisté à réaliser ce qu'on appelle un krigeage. Cela consiste à attribuer une valeur à tout point selon l'équation générale pour la prédiction spatiale linéaire (WEBSTER et OLIVIER, 2003, cités par COLINET, 2003).

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{où } x_0 \text{ est le point ciblé, les valeurs } Z(x_i), i=1 \text{ à } n, \text{ sont les valeurs mesurées et } \lambda_i \text{ le poids attribué à ces valeurs.}$$

Le krigeage a été réalisé à l'aide du programme ArcGis 9.1.



Différentes cartes ont été obtenues en fonction du paramètre mesuré et de la parcelle. La structure spatiale de chacune d'elle a ainsi pu être observée de manière à comprendre les relations entre les différents paramètres et les facteurs explicatifs de cette structure spatiale. Ainsi, on a pu montrer que la topographie et le drainage étaient directement corrélés avec les teneurs en P et le TSP.

5.2.3. Détermination du nombre d'échantillons adéquat

Enfin, la question s'est posée de savoir le nombre d'échantillons à réaliser pour connaître la valeur moyenne avec une précision donnée. Pour déterminer le nombre d'échantillons adéquat la formule suivante a été utilisée :

$$n = \frac{(t^2 CV^2)}{e^2}$$

où t = valeur du t de Student pour un intervalle de confiance défini (95%),
 CV = coefficient de variation estimé de la population,
 e = erreur relative d'estimation de la moyenne,
 n = nombre d'échantillons à prélever.

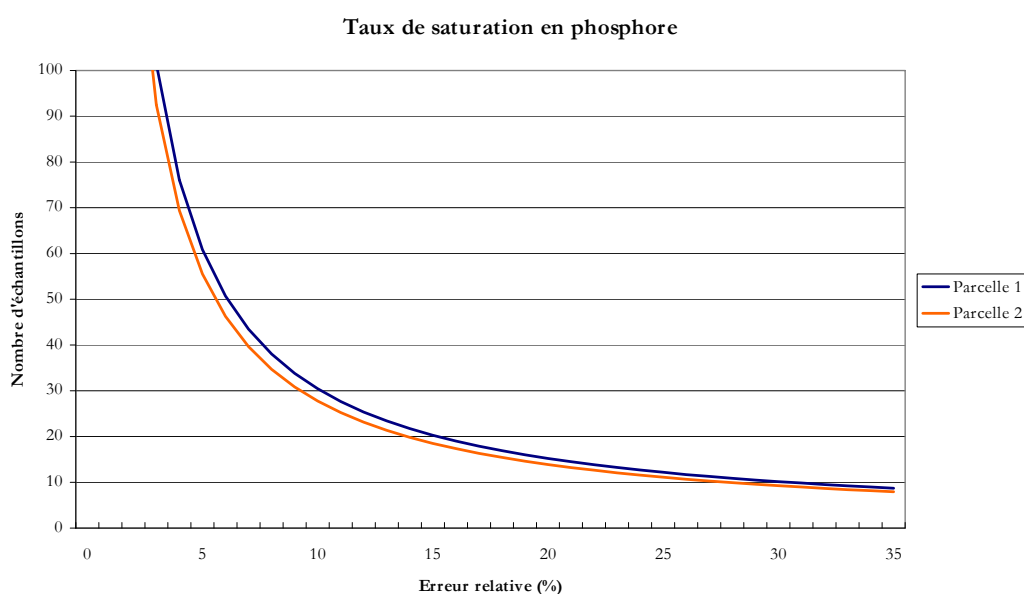


Figure 5 - Graphique représentant le nombre d'échantillons en fonction de l'erreur relative acceptée pour les deux parcelles.

La figure 5 illustre l'erreur relative en fonction du nombre de prélèvements réalisés. On remarque qu'un échantillonnage classique d'une vingtaine de prélèvement comme le propose différents auteurs engendre un coefficient de variation pour le TSP de l'ordre de 13%, ce qui est acceptable. Les résultats sont les mêmes pour les autres paramètres mesurés.

5.3. Etude de la variabilité temporelle

L'étude du TSP dans les sols agricoles ne peut être abordée sans comprendre l'évolution de ce paramètre en fonction des années et des modes de gestion mis en place. Cette étude d'une éventuelle évolution temporelle a pour objectif de percevoir les effets sur le TSP et les propriétés du sol de différents apports de P, ainsi que la rapidité avec laquelle ces paramètres peuvent évoluer.

Cette étude de la variabilité temporelle du TSP fut possible grâce à la présence d'échantillons de sol issus des parcelles du Survey Surfaces Agricoles datant de 2004. Des échantillons ont été prélevés en 2008 selon les mêmes modalités (échantillonnage composite) afin de permettre des comparaisons à 4 ans d'intervalle.

Les résultats des analyses de laboratoire ont été analysés et un certain nombre d'observations peuvent être faites.

5.3.1. Evolution des paramètres édaphiques et du phosphore

Les paramètres édaphiques sont très peu variables au fil du temps car les modes de gestion ont très peu variés entre 2004 et 2008. Par contre, les paramètres liés au phosphore sont quant à eux beaucoup plus variables. Le tableau 1 illustre bien l'évolution des différents paramètres au fil du temps de manière générale, en fonction des modes de gestion et des différentes exploitations.

Tableau 1 - Tableau récapitulatif des tendances des différents paramètres liés au TSP entre 2004 et 2008 et des moyennes de ces tendances.

		P _{dispo}	P _{ox}	Al _{ox}	Fe _{ox}	CFP	TSP
Général		↗ + 1,2 mg/100g	↗ + 2 mmol/kg	*	*	*	↗ + 7,7 %
Modes de gestion	1	*	*	↘ - 4,2 mmol/kg	*	↘ - 2,9 mmol/kg	↗ + 6 %
	2	*	*	*	*	*	*
	3	*	↗ + 3,6 mmol/kg	*	*	*	↗ + 11 %
Agriculteurs	1	*	*	*	*	*	*
	2	*	*	*	*	*	*
	3	*	*	*	*	*	*
	4	↗ + 5,7 mg/100g	↗ + 0,8 mmol/kg	*	*	*	↗ + 15,4 %
	5	*	*	↘ - 0,9 mmol/kg	*	↘ - 3,9 mmol/kg	↗ + 7,5 %

↗ Augmentation ↘ Diminution * Pas de différence significative entre les 2 années

Globalement, les teneurs en P_{ox} et en P_{dispo} augmentent entre les années 2004 et 2008. De même, le TSP augmente de manière générale et cela est principalement dû à l'augmentation des teneurs en P. La diminution générale de la CFP joue également un rôle mais de manière plus limitée.

L'analyse plus détaillée de cette augmentation est par contre assez surprenante car elle a principalement lieu au sein de l'exploitation 4 dont le bilan est négatif, c'est-à-dire que les apports en P sont faibles et/ou que les exportations sont importantes. Cette augmentation peut atteindre 50% dans certaines parcelles de cette exploitation. C'est la seule exploitation où une différence significative peut être mise en évidence entre 2004 et 2008. Cependant, dans les autres exploitations des différences bien que non significatives sont perceptibles. Cette augmentation du TSP de plus de 15% est assez surprenante et est peut-être due à des apports récents de fumier bovin. Aucun apport organique n'avait, en effet, été

réalisé en 2004 avant l'échantillonnage. Ces augmentations dans les exploitations présentant les bilans phosphatés négatifs pose évidemment des problèmes d'interprétation.

On peut s'inquiéter de la présence d'un TSP de plus de 80% ayant connu une augmentation de 18% en trois ans. Si cette augmentation du TSP venait à se poursuivre, on estime qu'en six ans, le sol serait complètement saturé. De plus, il s'agit de la seule parcelle de l'exploitation 1 présentant un bilan équilibré et de la seule montrant une telle augmentation. On peut donc se poser des questions quant à la pertinence du TSP en tant qu'indicateur des bonnes pratiques agricoles.

Le Fe_{ox} et l' Al_{ox} sont, quant à eux, liés à la fois au type de sol et au mode de gestion des exploitations. De manière générale, une diminution de la teneur en Al_{ox} est observée au cours des 4 années, principalement au sein des exploitations avec un bilan excédentaire. Des apports importants d'engrais ont donc comme conséquence de diminuer l' Al_{ox} . Cette tendance avait déjà pu être observée par d'autres auteurs (LABOSKI et LAMB, 2004).

L'étude de l'évolution de la **CFP** n'apporte aucune information nouvelle car elle correspond à la moyenne arithmétique du Fe_{ox} et de l' Al_{ox} . Elle est donc liée à la fois au type de sol et au mode de gestion.

Ces résultats engendrent un questionnement quant aux facteurs explicatifs de ces fortes variations. Différentes pistes de réflexion peuvent être explorées sans pour autant découler en une réponse claire.

La piste d'une erreur analytique peut éventuellement expliquer, en partie, ces variations. Cependant, cette différence entre 2004 et 2008 n'est pas systématique et sont relativement élevées. Une erreur d'échantillonnage peut également jouer mais toutes les précautions ont été prises afin de limiter cette dernière. De plus, la variabilité entre deux échantillons composites est en général plus faible que la variation entre les années.

LEINWEBER *et al.* (1999) parlent également de différences de TSP en fonction de la saison de prélèvement. Les échantillons de 2004 ont été prélevés à une période différente de ceux de 2008 mais les conditions météorologiques étaient *a priori* semblables. Cette différence, si elle existe, est relativement faible et devrait être systématique.

Evolution du taux de saturation en phosphore entre 2004 et 2008

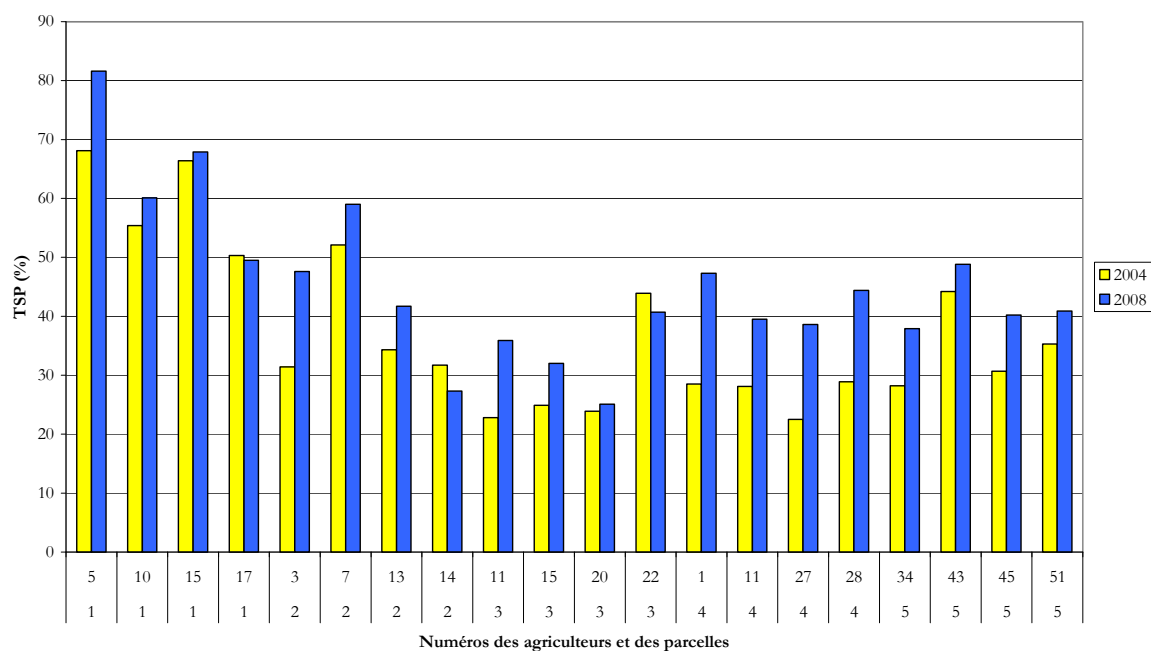


Figure 6 - Evolution du TSP en fonction des exploitations et des années.

5.4. Parcelles de la loi du minimum

La FUSAGx dispose d'une parcelle expérimentale où les pratiques agricoles sont les mêmes au sein de chaque sous-parcelle depuis maintenant plus de 100 ans. L'étude de ce dispositif expérimental permet de mettre en évidence l'effet des apports phosphatés sur le TSP. De plus, ce dispositif permet de percevoir l'effet d'absence d'apport en P sur le TSP.

5.4.1. Site expérimental

Ces parcelles étudient ce que l'on appelle la loi du minimum ou loi de Liebig et qui stipule que le niveau de production le plus limitant, c'est-à-dire l'élément qui se trouve en plus faible quantité relativement au besoin des plantes, détermine le niveau de rendement d'une culture (DETHY, 1981 ; PELLERIN *et al.*, 2005).

Ces parcelles ont été installées en 1890 et reçoivent 5 types d'apport (HANOTIAUX et MANIL, 1963 ; DETHY, 1981) :

- 0 : absence totale de fumure,
- NP : absence de fumure potassique,
- NK : absence de fumure phosphatée,
- PK : absence de fumure azotée, et
- NPK : fumure complète.

Seuls trois modes de gestion ont été étudiés dans le cadre de ce travail. Il s'agit des traitements 0, NK et NPK.

5.4.2. Etude des paramètres édaphiques

Plusieurs études (HANOTIAUX, 1961 ; HANOTIAUX et MANIL, 1963 ; HANOTIAUX et MANIL, 1964 ; HANOTIAUX, 1966 ; DETHY, 1981 ; HOMSY, 1992) ont déjà été réalisées dans le passé sur ces parcelles et les données peuvent être comparées à ces résultats antérieurs.

L'analyse des paramètres édaphiques relatifs à ces parcelles montre une certaine variabilité. En effet, il semble que le type de sol ne soit pas aussi homogène que l'on pouvait le penser. Les sondages pédologiques réalisés font penser à des remaniements anciens.

Le pH, par exemple, varie entre les différents traitements, ce qui démontre l'influence des modes de gestion sur ce paramètre. En effet, on remarque un pH supérieur dans les parcelles où les exportations sont les plus faibles (parcelle 0). Ces différences pourraient être dues au fait que les exportations importantes délogent plus de cations qui sont remplacés par des protons, extraits lors des analyses pH.

Le carbone organique total (COT), quant à lui, présente une variabilité assez importante (CV=23%) liée au sol et non aux modes de gestion. Cette forte variabilité pourrait éventuellement être due à des dépôts de charbon de bois retrouvés dans certains échantillons.

Enfin, la capacité d'échange cationique (CEC) présente une variabilité relativement faible (CV=11%) liée aux fumures apportées avec des valeurs allant de 9,0 à 13,0 cmol(+)/kg. En effet, la CEC est systématiquement plus élevée dans les parcelles 0 que dans les parcelles NK et NPK, ces derniers ayant les valeurs les plus faibles. La CEC est donc inversement proportionnelle aux rendements des cultures et donc aux exportations. Cela est en partie expliqué par les teneurs en COT.

Ces résultats concordent bien avec ceux observés lors des études précédentes sachant qu'une partie des résultats ne peut être comparée car les méthodes d'analyse ont évoluées. Cependant, certains résultats diffèrent fortement, entre autre, à cause d'un chaulage qui a eu lieu en 2000 et a augmenté le pH d'une unité.

5.4.3. Etude du taux de saturation en phosphore

Les paramètres liés au phosphore sont, quant à eux, expliqués par le mode de gestion phosphatée de la parcelle. Ces différences se marquent à la fois sur le P_{ox} , le P_{dispo} mais également sur le TSP, dont les coefficients de variation sont relativement importants. Par contre, le Fe_{ox} , l' Al_{ox} et la CFP dépendent des caractéristiques du sol, ce qui engendre des coefficients de variation plus faibles.

Les teneurs en P_{dispo} sont plus faibles dans les parcelles NK que dans les parcelles 0. Cela s'explique par les différences de rendement, de développement racinaire et donc d'exportation entre ces deux types de fumure. En effet, les rendements dans les parcelles 0 sont le tiers de ceux des parcelles NK. Les restitutions en P par les pailles sont donc, proportionnellement aux exportations, plus élevées dans les parcelles 0.

Ces effets sont cependant assez peu marqués contrairement à ce à dont on pouvait s'attendre en regard de ce qui a déjà été réalisé ailleurs où les différences de teneurs se marquent déjà après 10 ans (DESTAIN, 1984 ; TRAN *et al.*, 1996). Ici, les réserves du sol en P ne sont pas épuisées dans les parcelles ne recevant pas de P. Il faut cependant prêter attention aux échantillons issus des parcelles NK et présentant une teneur en P_{dispo} de 5 et 5,7 mg/100g, sachant que le seuil de fertilité est généralement considéré comme 5 mg/100g. Cette valeur n'ayant été atteinte qu'au bout de 100 ans, une préconisation des impasses en P peut être envisagée.

Le Fe_{ox} et l' Al_{ox} sont à la fois liés aux caractéristiques du sol et aux modes de gestion. Les teneurs en Al_{ox} ont ainsi tendance à être supérieures dans les parcelles recevant des apports d'engrais vis-à-vis de celles n'en recevant pas ou peu. Il s'agit d'une tendance inverse de ce qui avait été observé jusqu'à présent. Deux phénomènes peuvent expliquer cette concentration plus importante en Al_{ox} . Tout d'abord,

les apports d'engrais ont généralement pour effet d'acidifier le sol, ce qui a comme conséquence de libérer d'avantage d'Al. Deuxièmement, dans ces parcelles à haut rendement, le développement racinaire est plus important, ce qui a pour effet d'altérer d'avantage les minéraux et la fraction argileuse du sol, avec comme conséquence une libération d'Al et de Fe. Ce phénomène est plus marqué sur l'Al_{ox} que le Fe_{ox} dont les teneurs sont davantage liées aux propriétés du sol et plus particulièrement au drainage.

Enfin, le TSP est une combinaison des paramètres précédents. Le coefficient de variation (12%) est intermédiaire des deux paramètres intervenant dans le calcul (P_{ox} et CFP). Le TSP est en grande partie expliqué par le P_{ox}. Ainsi, les valeurs les plus élevées de ce paramètre sont observées dans les parcelles NPK et les plus faibles dans les parcelles NK. Ces différences entre les modes de gestion ne sont pas suffisamment marquées pour pouvoir être mises en évidence par l'analyse statistique. Le TSP semble donc, dans ce cas, représentatif des modes de gestion phosphatés.

6. Corrélations

Une série de corrélations ont pu être mises en évidence lors de l'analyse des résultats de l'échantillonnage. Elles sont fonction de la question abordée et des échantillons prélevés. Sans rentrer dans les détails de chaque question, il est important de préciser les grands types de corrélations observées. Voici un graphique avec les valeurs des coefficients de Pearson et des p-values correspondantes pour l'ensemble des échantillons prélevés dans le cadre de ce travail de fin d'études. Les valeurs significatives ($p\text{-value} \leq 0.05$) sont indiquées en gras.

	Argile												
COT	-0.139 0.201	COT											
Nt	-0.040 0.714	-0.044 0.681	Nt										
CEC	0.341 0.001	-0.120 0.261	-0.051 0.637	CEC									
pHH2O	-0.079 0.618	-0.309 0.039	0.301 0.047	0.612 0.000	pHH2O								
pHKCl	-0.121 0.447	-0.309 0.039	0.408 0.006	0.556 0.000	0.958 0.000	pHKCl							
Pdispo	-0.411 0.000	-0.010 0.928	0.136 0.202	-0.105 0.323	0.236 0.119	0.263 0.081	Pdispo						
Pox	-0.280 0.009	0.125 0.240	-0.034 0.750	-0.376 0.000	-0.459 0.002	-0.398 0.007	0.551 0.000	Pox					
Feox	0.245 0.023	-0.124 0.243	-0.222 0.036	-0.095 0.375	-0.642 0.000	-0.660 0.000	-0.259 0.014	0.380 0.000	Feox				
Alox	0.378 0.000	-0.113 0.291	-0.169 0.113	0.322 0.002	-0.175 0.250	-0.214 0.159	-0.498 0.000	-0.058 0.586	0.605 0.000	Alox			
CFP	0.318 0.003	-0.133 0.212	-0.225 0.034	0.048 0.654	-0.540 0.000	-0.567 0.000	-0.373 0.000	0.259 0.014	0.957 0.000	0.811 0.000	CFP		
TSP	-0.536 0.000	0.192 0.070	0.135 0.206	-0.360 0.000	0.041 0.791	0.101 0.511	0.808 0.000	0.618 0.000	-0.438 0.000	-0.695 0.000	-0.576 0.000	TSP	

Figure 7 - Matrice de corrélation relative à l'ensemble des échantillons prélevés dans le cadre de ce travail.

De nombreuses corrélations peuvent être observées entre les paramètres intervenant dans le calcul du TSP. Ainsi, la corrélation entre l' Al_{ox} et le Fe_{ox} ($r = 0,605$) peut être observée et provient du fait qu'ils coexistent dans une phase mal cristallisée (SATUPHOS, 2008). De même, la CFP étant dérivée de ces deux paramètres, une bonne corrélation est observée avec le Fe_{ox} ($r = 0,957$) et l' Al_{ox} ($r = 0,811$). On peut remarquer que le Fe_{ox} intervient de façon plus significative dans la détermination de la CFP que l' Al_{ox} . Cela n'est cependant pas une généralité car lors de certaines questions, la corrélation avec Al_{ox} n'est pas visible. De même, les teneurs du TSP sont principalement déterminées par le P_{ox} .

Outre les corrélations des paramètres entrant dans le calcul du TSP, différentes corrélations ont pu être déterminées mais elles sont relativement peu nombreuses. Cela est dû au fait que les paramètres édaphiques présentent des gammes de valeurs assez réduites du fait de la localisation de tous les échantillons dans des cultures et non dans des prairies où les teneurs diffèrent davantage. On peut, par exemple, citer la bonne corrélation entre l'argile et le l' Al_{ox} car l'Al est présent dans la fraction argileuse. Enfin, la teneur en argile présente une bonne corrélation avec P_{ox} , en tant que site fixateur du P via des ponts cationiques ou des oxydes de Fe et d'Al. Les sols présentant des teneurs importantes en argile ont un faible TSP car les oxydes de fer sont liés avec l'argile, ce qui augmente la CFP.

Par contre, contrairement à ce qui est observé dans les données issues de SCHADECK (1997) et SATUPHOS (2008), aucune relation avec le COT n'a pu être mise en évidence. Enfin, on observe une bonne corrélation de la CEC avec le TSP et la CFP. Celle-ci provient de la corrélation entre la CEC et l' Al_{ox} ($r = 0,494$). De plus, les sols contenant des quantités importantes d'Nt présentent un TSP élevé car l'Nt est un indice de la gestion des intrants par l'agriculteur.

Enfin, une très bonne corrélation entre P_{ox} et P_{dispo} ($r=0,551$) a pu être déterminée et est encore très fortement améliorée lorsque l'on distingue les différents types de sol. Cette bonne corrélation indique d'une part que la méthode analytique d'évaluation du TSP est adéquate puisque les résultats sont corrélés avec le P_{dispo} dont la méthode a déjà fait ces preuves. D'autre part, cette corrélation signifie que l'évaluation du P_{dispo} n'est pas pertinente en soi car elle n'apporte aucune information supplémentaire vis-à-vis du P_{dispo} . De plus, le P_{ox} demande une charge de travail plus importante. L'observation de cette courbe de régression montre également que les deux extractifs ne discriminent pas ce qui vient d'une forme plutôt qu'une autre.

Cette bonne relation s'explique par le fait que le P apporté se fixe principalement sur les formes ioniques, complexées et amorphes de l'Al et du Fe, déterminées par dans P_{ox} .

Cependant, il est important de remarquer que ce n'est pas parce qu'il y a corrélation qu'il y a systématiquement lien logique et explicatif entre les paramètres.

7. Etude critique du taux de saturation en tant qu'indicateur agronomique

Les différentes questions abordées dans ce travail de fin d'études ne répondent pas de manière directe à l'objectif principal de ce travail qui était d'évaluer le TSP en tant qu'indicateur des pratiques agricoles en matière de fertilisation phosphorée. Pour ce faire, il est nécessaire d'évaluer les différentes conditions que doit respecter un bon indicateur, ces dernières étant issues d'une étude du SAFE.

Voici la réflexion réalisée sur chacune de ces conditions en fonction des résultats obtenus sur base de ce travail :

- **DISCRIMINATION DANS LE TEMPS ET DANS L'ESPACE** : Lors de ce travail de fin d'études, des différences du TSP ont pu être mises en évidence entre les exploitations agricoles, les modes de gestion mais également entre les années. Ces différences ne sont cependant pas toujours claires. En effet, il a été demandé lors de la caractérisation du TSP (cf. 5.1) que le TSP ne pouvait pas être directement relié au bilan phosphaté réalisé ou aux caractéristiques de la région. Le TSP n'est donc que peu discriminant.
- **JUSTESSE ANALYTIQUE** : Cette méthode analytique, loin d'être reconnue internationalement, est actuellement utilisée en Flandre, aux Pays-Bas, en Allemagne, *etc.* Des essais interlaboratoires (VITO, REQUASUD) ont montré que cette méthode était correcte et présentait une répétabilité acceptable. Une corrélation très hautement significative a également pu être mise en évidence entre le P_{ox} et le P_{dispo} utilisé en routine, preuve de la justesse de la méthode d'analyse à l'oxalate d'ammonium.
- **COUT ET TEMPS D'ANALYSE** : L'extraction à l'oxalate d'ammonium demande un temps d'analyse plus long que l'extraction selon la méthode de Lakanen et Erviö. En effet, une série de 22 échantillons nécessite une journée d'analyse pour le P_{dispo} et 2 jours pour la détermination du TSP. Cette main d'œuvre supplémentaire a évidemment un coût important. De plus, le dosage du Fe et de l'Al extraits à l'oxalate pose des problèmes au niveau du spectrophotomètre car a tendance à boucher les tubes de l'appareil.
- **TRANSPARENCE ET FACILITE D'INTERPRETATION** : S'agissant d'un rapport de deux facteurs, la compréhension du TSP est parfois ambiguë. En effet, l'interprétation est généralement réalisée sur les paramètres sous-jacents (P_{ox} et CFP) en fonction des modes de gestion pour le P_{ox} et du type de sol pour la CFP. Cela rend l'analyse parfois difficile mais permet d'évaluer deux paramètres en une seule étape. Par contre, l'expression de ce paramètre en pourcents facilite généralement la compréhension mais cela nécessite l'établissement de seuils. Le TSP répond bien à un objectif et à une logique d'évaluation des risques environnementaux et illustre parfaitement la logique de saturation des sols. En revanche, sa compréhension et son interprétation agronomique sont difficiles. Ce paramètre est donc loin d'être idéal.
- **PERTINENCE VIS-A-VIS DES REGLEMENTATIONS** : Le TSP est déjà utilisé en Flandre depuis 1990 pour évaluer les quantités de P qu'il est autorisé d'épandre. Des seuils ont été définis en fonction des régions. Cependant, aucun de ces seuils n'est utilisable en Région wallonne dans l'état actuel des choses car les valeurs issues de ce travail sont systématiquement supérieures à ces seuils. Une adaptation est éventuellement envisageable pour la Région wallonne mais demanderait une étude approfondie du lien entre le P présent dans les eaux de ruissellement et le TSP. Ces seuils devraient être adaptés aux régions et aux contextes géographiques.
- **"TRANSPOSABILITE"** : Le TSP est utilisable dans toutes les exploitations et pratiquement tous les types de sol. Des problèmes peuvent cependant subvenir dans les sols calcaires.

Malgré sa justesse, la méthode d'analyse du TSP ne présente que peu d'intérêt car elle est assez longue à réaliser, plus coûteuse et ne fournit que peu d'informations supplémentaires vis-à-vis du P_{dispo} . De plus, sa relation avec les apports en P est assez ambiguë et ce paramètre semble assez peu discriminant vis-à-vis des pratiques agricoles. Sa relation avec les types de sol complique encore les choses. En effet, son interprétation est assez difficile car le paramètre doit être décomposé. Dans l'état actuel des choses, le TSP n'est nullement utilisable dans un but agronomique. Il pourrait éventuellement être utilisé dans une démarche environnementale mais cela nécessiterait une phase préalable de détermination des seuils acceptables. Cependant, on peut se poser des questions quant à la pertinence de cet indicateur dans un but environnemental car il ne tient pas compte des conditions topographiques de la parcelle, comme c'est le cas pour d'autres indicateurs.

8. Conclusion et perspectives

Une étude agronomique des paramètres édaphiques nécessite des indicateurs agronomiques adéquats. Le taux de saturation en phosphore, généralement utilisé en tant qu'indicateur environnemental, pourrait éventuellement devenir un indicateur agronomique. Pour tester cette hypothèse, différentes questions plus précises ont été abordées.

Les résultats tendent à montrer que le TSP est loin d'être l'indicateur espéré. En effet, six critères ont permis de montrer que ce paramètre était inadéquat pour les sols en Région wallonne en tant qu'indicateur des bonnes pratiques agricoles en matière de fertilisation phosphorée. Par contre, aucun jugement n'a été porté sur le rôle environnemental de cet indicateur. Cela demanderait une étude approfondie.

En dehors du rôle du TSP en tant qu'indicateur agronomique, l'étude de ce paramètre a permis de répondre à un certain nombre de questions plus précises et de contribuer à une meilleure connaissance de la relation du TSP avec les paramètres édaphiques et les types de sol, de même qu'avec les apports en phosphore.

Une question importante a également pu être résolue lors de cette analyse, il s'agit de déterminer les règles d'échantillonnage à respecter pour être dans les conditions d'analyse statistiques optimales. En effet, les échantillons doivent *a priori* être indépendants les uns des autres mais il a pu être montré que cette condition ne devait pas être obligatoirement respectée dans le cas du TSP car elle n'améliore pas la précision des résultats. De même, il a pu être démontré qu'un échantillonnage composite classique d'une vingtaine d'échantillons était suffisant.

Par ailleurs, l'étude des corrélations et des distributions des paramètres a permis de faire ressortir le rôle majeur joué par le P_{ox} dans la détermination TSP et celui du Fe_{ox} dans la détermination de la CFP.

Une réflexion sur le choix de la méthode analytique à appliquer a également été réalisée. En effet, la méthode de Blakemore sur laquelle le choix s'est porté est une méthode développée pour les sols plutôt sableux. Cependant, une bonne corrélation entre le P_{dispo} et le P_{ox} tend à laisser penser que cette méthode serait également adaptée aux sols limoneux et autres sols étudiés. Cette bonne corrélation entre les deux formes du P permet de démontrer le peu d'informations supplémentaires apportées par le P_{ox} vis-à-vis du P_{dispo} , alors que l'analyse est plus complexe et plus longue.

Les résultats des échantillons prélevés ont été analysés en fonction des modes de gestion du P appliqué au sein des différentes parcelles et en fonction des paramètres édaphiques mesurés.

Des différences entre les exploitations ont pu être mises en évidence pour de nombreux paramètres. Ces différences sont, par contre, rarement mises en évidence entre les modes de gestion. Ce dernier critère, construit sur base des bilans phosphatés, n'est donc pas des plus adaptés pour expliquer les différences entre les paramètres. Les différences entre les régions ne peuvent également être perçues car les trois régions échantillonnées présentent des valeurs de capacité de fixation en phosphore et du P_{ox} relativement similaires (SATUPHOS, 2008).

Des différences entre les types de sol ont également pu être perçues mais le nombre d'échantillons est généralement insuffisant pour arriver à des conclusions objectives et sûres. Des différences significatives ont néanmoins pu être mises en évidence en fonction de la texture et du drainage.

Il est cependant parfois difficile d'établir des relations objectives entre les paramètres car ces dernières sont souvent contradictoires en fonction de la question abordée et de la région d'étude. Ainsi les teneurs en Al_{ox} augmentent dans le cas d'apports importants en P dans le cas de la question 4 (étude des parcelles de la loi du minimum) alors qu'elles diminuent dans le cas de la question 1 (caractérisation du TSP).

Ce travail permet d'envisager un certain nombre de perspectives possibles. On peut éventuellement envisager la possibilité de déterminer la CFP en fonction du type de sol auquel on affaire et d'estimer le P_{ox} en fonction du P_{dispo} , ce qui permettrait de connaître facilement le TSP. Cependant, il ne s'agit que d'hypothèses qui nécessiterait la réalisation d'un nombre d'échantillons beaucoup plus important.

De même, une évaluation environnementale de ce paramètre permettrait d'estimer l'utilisation possible ou non de ce paramètre, de même que l'intérêt de son étude et les seuils à respecter.

Ce document n'explique pas de façon approfondie les propriétés du taux de saturation en P mais a néanmoins contribué à approfondir les connaissances des facteurs intervenant sur le TSP et de l'impact sur celui-ci que peuvent avoir les modes de gestion appliqués. Il constitue une phase préliminaire mais non suffisante qui mériterait d'être approfondie par d'autres recherches.

En effet, le temps et les moyens à notre disposition pour ce travail ne nous ont pas permis d'élargir l'étude à de nombreux contextes.

Le nombre d'échantillons fut également un facteur limitant dans ce travail par rapport au nombre de questions traitées. En effet, certaines classes de sol sont très peu représentées et il est assez difficile d'en tirer des conclusions. Des échantillons complémentaires permettraient d'améliorer la compréhension du problème.

Un suivi des parcelles pourrait être réalisé de manière à mieux mettre en exergue les effets des apports au cours des saisons et une éventuelle influence de la période d'échantillonnage.

Quoi qu'il en soit, de nombreuses questions restent encore sans réponse et les recherches sur le phosphore et le taux de saturation en phosphore sont loin d'être abouties. Cette problématique risque d'être de plus en plus d'actualité et ce type d'étude peut contribuer à la compréhension de ce problème et à trouver des solutions agronomiques et environnementales adaptés.

9. Bibliographie

BEAUCHEMIN S. & SIMARD R.R. [1999]. Soil phosphorus saturation degree : review of some indices and their suitability for P management in Québec, Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, **79**, 615-625.

COLINET G. [2003]. *Eléments traces métalliques dans les sols : Contribution à la connaissance des déterminants de leur distribution spatiale en Région limoneuse belge*. Thèse de doctorat : Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux (Belgique), 416p.

DE SMET J., HOFMAN G., VAN MEIRVENNE M., VANDERDEELEN J. & BAERT L. [1996]. Variability of the Phosphate Saturation Degree of the sandy loam soil in west-Flanders, Belgium. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **27**(5-8), 1875-1884.

DESTAIN J-P. [1984]. *Etude par différentes méthodes d'extraction de l'évolution des réserves nutritives en phosphore et potassium de sols soumis à 3 niveaux de fumure*. Mémoire : Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux (Belgique), 117p.

DETHY C. [1981]. *La loi du minimum dans un essai de longue durée. Analyses des éléments nutritifs et influences sur la croissance et le rendement du froment*. Mémoire : Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux (Belgique), 102p.

DORIOZ J-M. & TREVISAN D. [2008]. Le transfert diffus du phosphore dans les bassins agricoles: ordres de grandeur, mécanismes, maîtrise. *Ingénieries - eau, agriculture, territoires, numéro spécial "Azote, phosphore et pesticides. Stratégies et perspectives de réduction de flux"*, 27-47.

HANOTIAUX G. [1961]. *Contribution à l'étude de la dynamique du phosphore et du potassium dans le sol*. Thèse de doctorat : Institut Agronomique de l'Etat à Gembloux, 272p.

HANOTIAUX G. [1966]. L'étude de la dynamique du phosphore du sol par la méthode du fractionnement. *Trans Comm. II & IV, Int. Soc. Soil Sci.*, IRSIA, publication N°7, 161-174.

HANOTIAUX G. & MANIL G. [1963]. Etudes sur la dynamique du phosphore et du potassium dans le sol. Première partie. Introduction et étude de l'action différenciatrice des fumures. *Pédologie*, **13**, 73-91.

HANOTIAUX G. & MANIL G. [1964]. Etudes sur la dynamique du phosphore et du potassium dans le sol. Quatrième partie. Formes du phosphore et du potassium extraites par l'acétate ammonique. *Pédologie*, **14**, 36-54.

HOMSY S. [1992]. *Comparaison de quatre méthodes utilisées en routine dans les laboratoires européens pour l'appréciation de l'offre en phosphore disponible du sol*. Mémoire : Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux (Belgique), 89p.

HUGHES S., REYNOLDS B., BELL S.A. & GARDNER C. [2000]. Simple phosphorus saturation index to estimate risk of dissolved P in runoff from arable soils. *Soil Use and Management*, **16**, 206-210.

LABOSKI C.A.M. & LAMB J.A. [2004]. Impact of manure application on soil phosphorus sorption characteristics and subsequent water quality implications. *Soil Science*, **169**(6), 440-448.

- LEINWEBER P., LÜNSMANN F. & ECKHARDT K.U. [1997]. Phosphorus sorption capacities and saturation of soils in two regions with different livestock densities in northwest Germany. *Soil Use and Management*, **13**, 82-89.
- LEINWEBER P., MEISSNER R., ECKHARDT K-U. & SEEGER J. [1999]. Management effects on forms of phosphorus in soil and leaching losses. *European Journal of Soil Science*, **50**, 413-424.
- MULLA D.J. & MCBRATNEY A.B. [2000]. Soil Spatial Variability. In : *Handbook of Soil Science* (éd. SUMMER M.E.), 26p.
- PELLERIN S., MOREL C. & DORIOZ J-M. [2005]. Bilan environnemental du phosphore. In : *Sols et Environnement. Cours, exercices et études de cas.* (eds. GIRARD M-C., WALTER C., BERTHELIN J. & MOREL J-L.). Paris, DUNOD, 628-649.
- SATUPHOS [2008]. *Etat des lieux du taux de saturation en phosphore des sols agricoles de la Région Wallonne et perspectives d'évolution compte tenu des apports de matière organique* (Rapport intermédiaire). Unité des Sciences du Sol – UCL, 23p.+annexes.
- SCHADECK N. [1997]. *Rétention et mobilisation du phosphore dans les sols agricoles de Belgique. Application particulière aux zones humides.* Thèse de doctorat : Université Catholique de Louvain-la-Neuve (Belgique). Unité des sciences du sol, 180p.
- SHARPLEY A.N. [1996]. Availability of residual phosphorus in manured soils. *Soil Science Society of America Journal*, **60**, 1459-1466.
- TRAN T.S., CÔTÉ D. & N'DAYEGAMIYE A. [1996]. Effets des apports prolongés de fumier et de lisier sur l'évolution des teneurs du sol en éléments nutritifs majeurs et mineurs. *Agrosol*, **9** (1), 21-30.
- VANDENBERGHE C. & MARCOEN J-M. [2004]. *Transposition de la Directive Nitrate (CE) en Région wallonne : azote potentiellement lessivable de référence pour les sols cultivés en Région wallonne.* Terre wallonne – humains admis. Colloques (16 avril 2004). Liège (Belgique), 55-62.